

4. Баннов А.Г., Уваров Н.Ф., Кувшинов Г.Г., Прокопчук Н.Р., Крутько Э.Т., Шашок Ж.С., Вишневский К.В. // Химия, технология органических веществ и биотехнология. – 2014. – N 4. – С. 31–34.
5. Нгуен Мань Хиеу, Коробочкин В.В. // «SCI-ARTICLE.RU»: электрон.научн.журн. – 2014. – N 12.

Научный руководитель: М.В. Попов, старший преподаватель, инженер НГТУ.

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРЯМОГО ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НАНОДИСПЕРСНОГО ОКСИДА ЦИНКА ДЛЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

А.И. Циммерман, Ю.Л. Шаненкова, М.И. Гуков  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭПП, группа 5А4Д

В последние годы перспективы использования различных функциональных материалов связаны с их уникальными особенностями в нанодисперсном состоянии. Оксид цинка, обладающий набором уникальных характеристик, можно отнести к таким материалам. Помимо уже известных областей его применения (медицина, фармацевтика, электроэнергетика, нефтеперерабатывающая промышленность), он имеет потенциал использования как фотокатализатора для получения водорода. Данное направление в настоящее время весьма перспективно ввиду перехода на чистую энергетику, поэтому получение и исследование является актуальной научной задачей [1, 2]. Кроме того, оксид цинка применяют при производстве стекла и керамики, а также ZnO является полупроводником n-типа благодаря монокристаллической структуре частиц, что позволяет на его основе изготавливать варисторы, которые используются в современных ограничителях перенапряжения (ОПН) [3, 4].

Существует множество способов получения оксида цинка: химический, гидротермальный, термический и др. [3-5]. Данные методы обладают рядом недостатков: высокая стоимость, продолжительный процесс получения. Также эти методы не позволяют получить достаточно качественный продукт, который имел бы необходимую структуру. Высокодисперсное монокристаллическое состояние может быть получено при кристаллизации из жидкой фазы с высокой скоростью закалки материала в условиях сверхзвукового распыления в газообразной атмосфере [6, 7]. Такие условия можно получить при реализации плазмодинамического метода на основе импульсного коаксиального магнитоплазменного ускорителя эрозионного типа (КМПУ) [8].

В отличие от сложных химических методов, плазмодинамический метод обеспечивает в одном кратковременном цикле работы КМПУ (до  $10^{-3}$  с)работку основного прекурсора – цинка, прямой синтез оксида цинка при взаимодействии с ионизированным кислородом, сверхзвуковое распыление жидкой фазы ZnO и его сверхбыструю кристаллизацию в газообразной кислородной

среде. В результате плазмохимической реакции синтезируется нанопорошок, сбор которого осуществляется через некоторое время после окончания рабочего цикла. Цель данной работы – показать принципиальную возможность реализации процесса плазмодинамического синтеза ультрадисперсного оксида цинка. Для этого была проведена серия экспериментов, в ходе которой были получены образцы продукта. Анализ синтезированного таким образом порошка осуществлялся с помощью аналитических методик, включающих рентгеновскую дифрактометрию и просвечивающую электронную микроскопию.

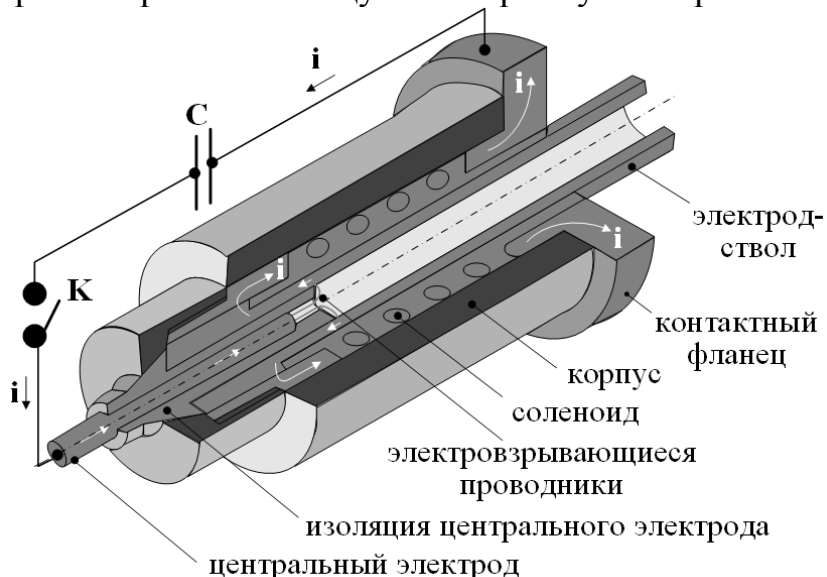


Рис. 1. Схема и принцип действия КМПУ

На рисунке 2 представлена типичная рентгеновская дифрактограмма порошка, синтезированного при истечении плазменной струи в камеру-реактор, заполненную на 100% кислородом. Представленные данные были получены с использованием рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD 7000S с Cu- $\alpha$  излучением. Расшифровка XRD-картины проведена с помощью программы Search-Match и базы структурных данных PDF-2. В результате расшифровки была идентифицирована фаза оксида цинка ZnO с номером карточки 36-1451, гексагональной сингонии, пространственной группы SG P63mc.

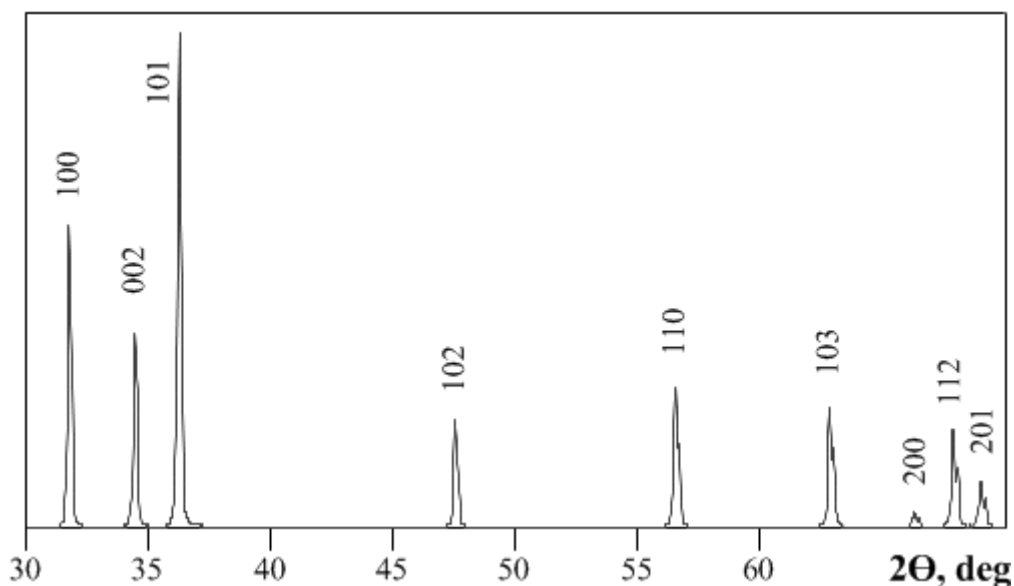


Рис. 2. Типичная XRD-картина синтезированного материала

При расшифровке данных просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ), приведенных на рисунке 3, монокристаллическое строение частиц становится очевидным. Высокая плотность частиц ZnO ( $\rho=5,61 \text{ г/см}^3$ ) позволила получить светлопольный ТЕМ-снимок хорошего качества на микроскопе Philips CM-12. На рисунках видно, что размер частиц варьируется в пределах от 10 нм до 400 нм. Одной из причин этого является импульсный характер плазменно-динамического процесса, в течение которого некоторые параметры системы изменяются в очень широких пределах, например, ток электропитания ускорителя, параметры электроразрядной плазмы и ее истечения из ускорительного канала. Ограники практически всех частиц представляют собой правильные прямоугольники и шестигранники.

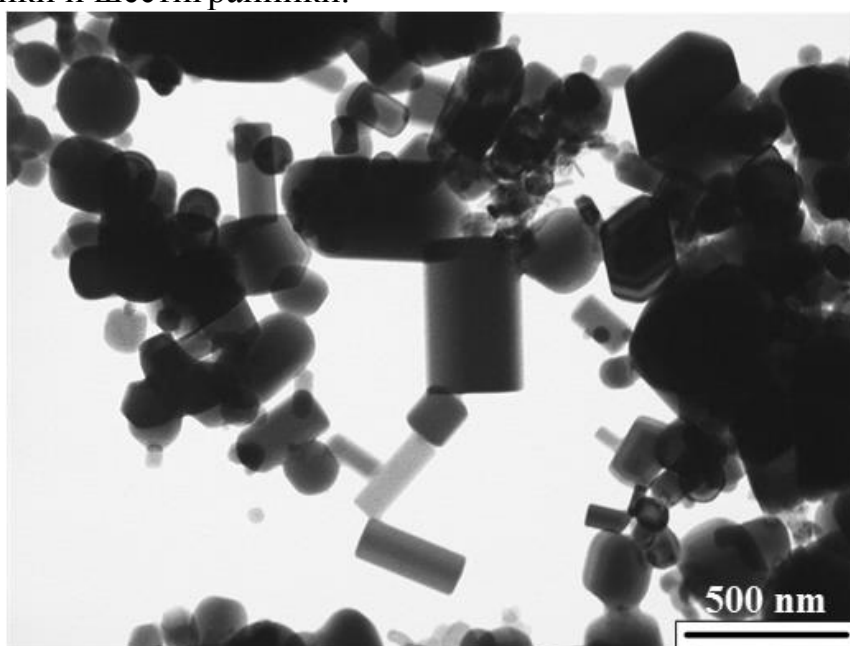


Рис. 3. Светлопольный ТЕМ-снимок синтезированного материала

По совокупности всех имеющихся светлопольных микроснимков (выборка объектов  $\sim 1000$ ) проведен анализ размеров частиц и построена гистограмма

их распределения по размеру (рисунок 4). По полученной гистограмме можно определить, что размер частиц достигает 350 нм, но большинство из них (85%) имеют размер менее 150 нм.

В результате проведенных исследований было установлено, что оксид цинка с монокристаллической структурой частиц может быть синтезирован с помощью плазмохимического метода с использованием коаксиального магнитоплазменного ускорителя. Этот метод позволяет получать ультрадисперсный порошок ZnO в течение одного короткого цикла с длительностью до 1 мс. С использованием данных рентгенофазового анализа, было установлено, что продукт имеет структуру гексагонального оксида цинка. Это подтверждается также данным просвечивающей электронной микроскопии, на которой четко видны кристаллы в форме правильных прямоугольников и шестигранников. По полученной гистограмме распределения частиц по размеру определено, что большинство частиц (85%) имеют размер менее 150 нм. Таким образом, предложенный метод может быть использован в качестве альтернативного для получения чистого гексагонального оксида цинка, причем преимуществами в данном случае будут являться: простота (один рабочий цикл), быстроедействие (менее 1 мс) и высокая чистота получаемого продукта. В дальнейшем предполагается провести исследование синтезированного продукта на каталитическую активность.

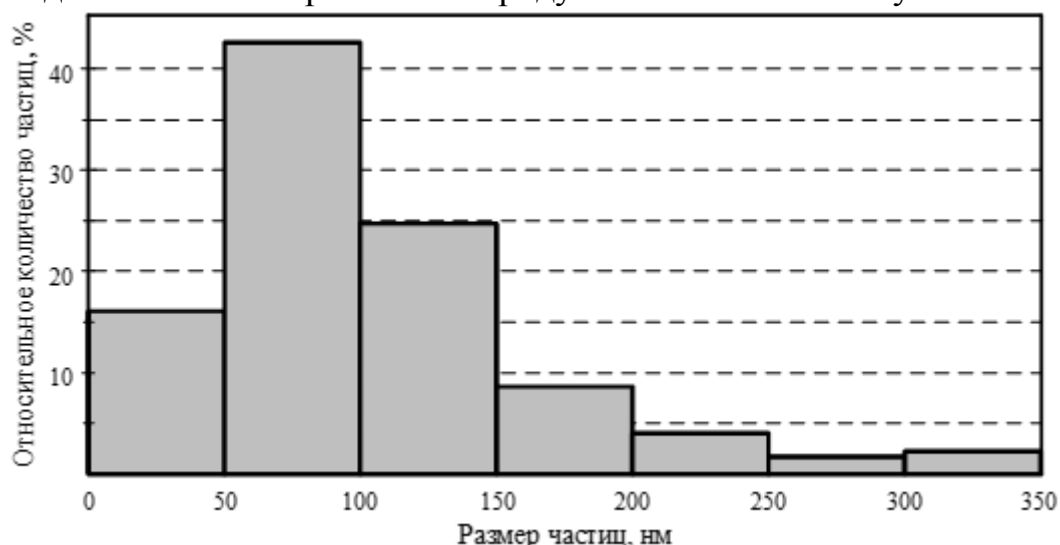


Рис. 4. Распределение частиц по размеру

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Raula M. et al. Ascorbate-assisted growth of hierarchical ZnO nanostructures: sphere, spindle, and flower and their catalytic properties // *Langmuir*. – 2010. – Т. 26. – №. 11. – С. 8769-8782.
2. Agrell J. et al. Production of hydrogen from methanol over Cu/ZnO catalysts promoted by ZrO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // *Journal of Catalysis*. – 2003. – Т. 219. – №. 2. – С. 389-403.
3. Sazonov R. et al. Plasma-chemical synthesis of composite nanodispersed oxides // *J. Korean Phys. Soc.* – 2011. – Т. 59. – №. 6. – С. 3508-3512.

4. Nolan N. T. Sol-Gel Synthesis and Characterisation of Novel Metal Oxide Nanomaterials for Photocatalytic Applications. – 2010.
5. Djurisić A. B. et al. ZnO nanostructures: growth, properties and applications // Journal of Materials Chemistry. – 2012. – Т. 22. – №. 14. – С. 6526-6535.
6. Sivkov A. et al. Plasma dynamic synthesis and obtaining ultradispersed zinc oxide with single-crystalline particle structure // Advanced Powder Technology. – 2016. – Т. 27. – №. 4. – С. 1506-1513.
7. Shanenkov I.I., Pak A.Ya., Sivkov A.A., Shanenkova Yu.L. Energy efficiency of electric pulse installation based on a high-current plasma accelerator // MATEC Web of Conferences. – 2014. – Vol. 19. – art. no. 01030
8. Пат. 137443 РФ. МПК7 H05H 11/00. Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель / А.А Сивков, А.С. Сайгаш, Ю.Л. Колганова. Заявлено 24.09.2013; Опубл. 10.02.2014, Бюл. № 4. – 6 с.

Научный руководитель: А.А. Сивков, д.т.н., профессор каф. ЭПП ЭНИН ТПУ.

## **ОЦЕНКА АБСОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ПОРОШКА ОКСИДА ЖЕЛЕЗА, ПОЛУЧЕННОГО ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ**

М.И. Гуков, И.И. Шаненков, А.И. Циммерман  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭПП, группа 5А4Д

### **Введение**

Электромагнитные волны гигагерцового диапазона широко распространены в системах беспроводной связи, компьютерах и различном электронном оборудовании. Тем не менее, проблемы электромагнитной совместимости серьезно ограничивают их дальнейшее развитие [1,2]. Согласно теории потерь электромагнитных волн, возможным способом решения таких проблем является разработка высокоэффективных поглощающих материалов. Большое внимание привлекают материалы на основе ферритов, отличающиеся высокими электромагнитными потерями [3,4]. Известно, что величина магнитной проницаемости пропорциональна значению намагниченности насыщения (НН), поэтому магнетит со структурой шпинели, обладающий максимальным значением НН среди ферритов при комнатной температуре и высоким значением температуры Кюри, можно рассматривать как один из наиболее перспективных материалов для разработки радиопоглощающих материалов и покрытий. Известно, что ферритовые поглотители, могут иметь хорошие абсорбционные характеристики для поглощения микроволнового излучения [5]. В этом исследовании порошок оксида железа с преимущественным содержанием магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  был успешно изготовлен методом плазмодинамического синтеза. Данный метод обладает следующими преимуществами: высокая скорость протекания реакции, низкие энергозатраты, высокие достигаемые энергетические параметры в процессе